

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2000-209063

(43)Date of publication of application : 28.07.2000

(51)Int.Cl.

H03H 9/17  
H01L 41/09

(21)Application number : 11-321594

(71)Applicant : MITSUBISHI ELECTRIC CORP

(22)Date of filing : 11.11.1999

(72)Inventor : MISU KOICHIRO  
YOSHIDA KENJI  
IHATA KOUJI  
WADAKA SHUZO  
YAMADA AKIRA  
UCHIKAWA HIDEFUSA  
MAEDA CHISAKO  
NAGATSUKA TSUTOMU

(30)Priority

Priority number : 10322094

Priority date : 12.11.1998

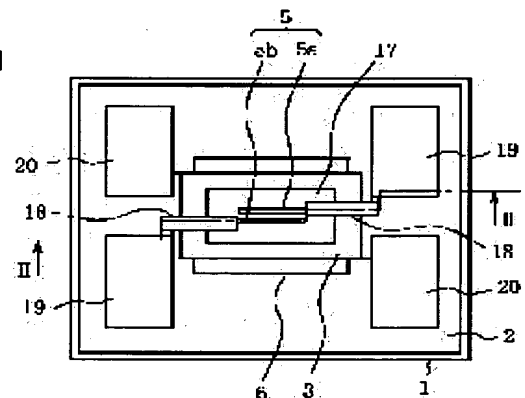
Priority country : JP

## (54) THIN FILM PIEZOELECTRIC ELEMENT

### (57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To provide a thin film piezoelectric element which can contain longitudinal vibration in the thickness direction as the primary vibration energy by means of a piezoelectric film having and also has better characteristics than the conventional one.

**SOLUTION:** This thin film piezoelectric element includes a silicon substrate 1, a dielectric film 21 consisting of a silicon nitride film 16 formed on the substrate 1 and a silicon oxide film 2 formed at the upper side of the film 16, a lower electrode 3 formed on the film 21, a piezoelectric film 17 formed on the electrode 3 and an upper electrode 5 formed on the film 17. Then the thickness direction of the part of the substrate 1 opposite to an area including the part where the electrode 5 exists is eliminated in a range covering from the bottom surface of the substrate 1 through the interface of the film 16. Thus, a via hole 6 is formed.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than

THIS PAGE BLANK (UPTO)

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号  
特開2000-209063  
(P2000-209063A)

(43) 公開日 平成12年7月28日 (2000.7.28)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>  
H 0 3 H 9/17  
H 0 1 L 41/09

識別記号

F I  
H 0 3 H 9/17  
H 0 1 L 41/09

テーマコード(参考)

F  
C

審査請求 未請求 請求項の数13 O L (全 18 頁)

(21) 出願番号 特願平11-321594  
(22) 出願日 平成11年11月11日 (1999. 11. 11)  
(31) 優先権主張番号 特願平10-322094  
(32) 優先日 平成10年11月12日 (1998. 11. 12)  
(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000006013  
三菱電機株式会社  
東京都千代田区丸の内二丁目2番3号  
(72) 発明者 三須 幸一郎  
東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三  
菱電機株式会社内  
(72) 発明者 吉田 憲司  
東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三  
菱電機株式会社内  
(74) 代理人 100066474  
弁理士 田澤 博昭 (外1名)

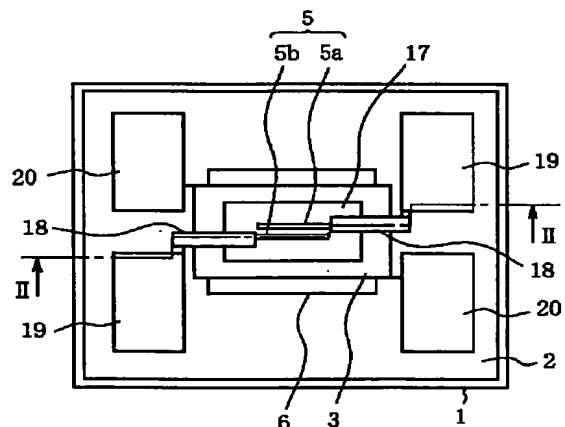
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 薄膜圧電素子

(57) 【要約】

【課題】 厚み縦振動を主振動とする圧電体膜を用いたエネルギー閉じ込め可能な、従来より良好な特性の薄膜圧電素子を得ることを目的とする。

【解決手段】 シリコン基板1と、シリコン基板1上に形成された窒化シリコン膜16と窒化シリコン膜16の上側に形成された酸化シリコン膜2とからなる誘電体膜21と、誘電体膜21上に形成された下部電極3と、下部電極3上に形成された圧電体膜17と、圧電体膜17上に形成された上部電極5とを備え、上部電極5が存在する部位を含む領域に対向するシリコン基板1の部位の厚さ方向を、シリコン基板1の底面から窒化シリコン膜16との境界面まで除去することによりバイアホール6が形成されている。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 基板と、上記基板上に形成された窒化シリコン (SiN) 膜と上記窒化シリコン膜の上側に形成された酸化シリコン (SiO<sub>2</sub>) 膜とからなる誘電体膜と、上記誘電体膜上に形成された下部電極と、上記下部電極上に形成された圧電体膜と、上記圧電体膜上に形成された上部電極とを備え、

上記上部電極が存在する部位を含む領域に対向する上記基板の部位の厚さ方向を、上記基板の底面から上記窒化シリコン膜との境界面まで除去することによりバイアホールが形成されている薄膜圧電素子。

【請求項2】 酸化シリコン膜は、窒化シリコン膜上及び上部電極上に分けて形成されていることを特徴とする請求項1記載の薄膜圧電素子。

【請求項3】 圧電体膜は、厚み縦振動を主振動し、酸化シリコン膜の厚さは、窒化シリコン膜の厚さが振動特性に影響しないように上記窒化シリコン膜の厚さよりも大きく、かつ、上記圧電体膜の厚さの1.5倍以上であることを特徴とする請求項1記載の薄膜圧電素子。

【請求項4】 基板と、上記基板の上側に形成された誘電体膜と、上記誘電体膜上に形成された密度10000 (kg/m<sup>3</sup>) 以上の導体からなる下部電極と、上記下部電極上に形成された厚み縦振動を主振動とする圧電体膜と、上記圧電体膜上に形成された密度10000 (kg/m<sup>3</sup>) 以上の導体からなる上部電極とを備え、上記圧電体膜の厚さを2hとし、上記誘電体膜の厚さをgとし、上記上部電極の密度を $\rho_1 \times 1000$  (kg/m<sup>3</sup>) とし、上記上部電極の厚さをd1とし、上記下部電極の密度を $\rho_2 \times 1000$  (kg/m<sup>3</sup>) とし、上記下部電極の厚さをd2とし、等価密度Rを $R = (\rho_1 d_1 / h) + (\rho_2 d_2 / h)$ としたとき、上記圧電体膜の厚さと上記誘電体膜の厚さとから定まる上記誘電体膜の規格化厚さ (g/h) が {0.15 × R + 2.8} 以上である薄膜圧電素子。

【請求項5】 基板と、上記基板の上側に形成された誘電体膜と、上記誘電体膜上に形成された密度10000 (kg/m<sup>3</sup>) 以上の導体からなる下部電極と、上記下部電極上に形成された厚み縦振動を主振動とする圧電体膜と、上記圧電体膜上に形成された密度10000 (kg/m<sup>3</sup>) 以下の導体からなる上部電極とを備え、上記圧電体膜の厚さを2hとし、上記誘電体膜の厚さをgとし、上記上部電極の密度を $\rho_1 \times 1000$  (kg/m<sup>3</sup>) とし、上記上部電極の厚さをd1とし、上記下部電極の密度を $\rho_2 \times 1000$  (kg/m<sup>3</sup>) とし、上記下部電極の厚さをd2とし、等価密度Rを $R = (\rho_1 d_1 / h) + (\rho_2 d_2 / h)$ としたとき、上記圧電体膜の厚さと上記誘電体膜の厚さとから定まる上記誘電体膜の規格化厚さ (g/h) が {0.023 × R + 3.5} 以上である薄膜圧電素子。

【請求項6】 誘電体膜は、基板上に形成された窒化シ

リコン (SiN) 膜を有し、

上部電極が存在する部位を含む領域に対向する上記基板の部位の厚み方向を、上記基板の底面から上記窒化シリコン膜との境界面まで除去したバイアホールが形成されていることを特徴とする請求項4または請求項5記載の薄膜圧電素子。

【請求項7】 誘電体膜は、基板上及び上部電極上に分けて形成されていることを特徴とする請求項4または請求項5記載の薄膜圧電素子。

【請求項8】 下部電極は、主に白金 (Pt) からなることを特徴とする請求項1、請求項4、または請求項5記載の薄膜圧電素子。

【請求項9】 下部電極は、主にイリジウム (Ir) からなることを特徴とする請求項1、請求項4、または請求項5記載の薄膜圧電素子。

【請求項10】 圧電体膜は、チタン酸鉛 (PbTiO<sub>3</sub>) を主成分とすることを特徴とする請求項3、請求項4、または請求項5記載の薄膜圧電素子。

【請求項11】 圧電体膜は、チタンジルコン酸鉛 (PZT) を主成分とすることを特徴とする請求項3、請求項4、または請求項5記載の薄膜圧電素子。

【請求項12】 圧電体膜は、タンタル酸リチウム (LiTaO<sub>3</sub>) を主成分とすることを特徴とする請求項3、請求項4、または請求項5記載の薄膜圧電素子。

【請求項13】 圧電体膜は、ボアソン比が0.33より小さい材料を主成分とすることを特徴とする請求項3、請求項4、または請求項5記載の薄膜圧電素子。

## 【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は、弾性波を利用した共振器、フィルタ等の薄膜圧電素子に関するものである。

【0002】

【従来の技術】図34及び図35は、例えば、文献：

「ZnO-SiO<sub>2</sub> 複合薄膜構造の2次厚み振動モードを利用したバルク弾性波デバイス」、日本音響学会講演論文集、pp. 691-692、昭和60年9月~10月 (以下、文献1と記す)、及び文献：「GHz帯バルク波基本共振子」、電子情報通信学会誌、Vol. 81, No. 5, pp. 468-472, 1998 (以下、文献2と記す) に示された従来のこの種の薄膜圧電素子を示す図である。図34は上面図、図35は図34中のI-I線に沿った断面図である。図中、1はシリコン (Si) 基板、2はシリコン基板1上に形成された酸化シリコン (SiO<sub>2</sub>) 膜、3は酸化シリコン膜2上に形成された下部電極、4は下部電極3上に形成された酸化亜鉛 (ZnO) からなる圧電体膜、5は入力側電極5aと出力側電極5bとに分けて、圧電体膜4上に形成された上部電極、6はバイアホールである。

【0003】上部電極5と下部電極3に電圧を印加すると、圧電体膜4の内部に電界が発生する。このとき、この電界によって、圧電体膜4に弾性的な歪が生じる。印加電圧が周波数 $f$ の信号である場合、この歪も同じ周波数 $f$ で振動し、弾性波を励振する。図34及び図35に示すような構造の場合、励振された弾性波は厚さ方向に伝搬し、上部電極5の表面と、誘電体膜2の下面のそれぞれの空気と接する面で、厚さ方向に伝搬した弾性波を反射する。このため、上部電極5の表面と、誘電体膜2の下面との間が、弾性波の2分の1波長の整数倍になるとき、弾性的な共振が生じる。

【0004】一方、圧電体膜4の内部では、表面に平行な方向の弾性波の伝搬も生じる。このときの圧電体膜4中の弾性波は、ある周波数 $f_0$ より低い周波数では遮断モードになり、ある周波数 $f_0$ より高い周波数では伝搬モードとなる。この周波数 $f_0$ は遮断周波数であり、圧電体膜4の表面が両面とも自由表面の場合は、圧電体膜4中を厚さ方向に伝搬する弾性波の2分の1波長に、圧電体膜4の厚さ $2h$ が一致する周波数に相当する。

【0005】表面に上部電極5がある電極部の場合、電極の厚さと質量負荷のために、電極部の遮断周波数 $f_{a0}$ は、下部電極3のみの無電極部の遮断周波数 $f_{f0}$ よりも低い。このため、周波数 $f_{f0}$ から $f_{a0}$ の間の範囲では、電極部では遮断周波数 $f_{a0}$ より高周波数側であるため伝搬モードであり、無電極部では遮断周波数 $f_{f0}$ より低周波数側であるため遮断モードとなる。このため、表面に平行に伝搬する弾性波は、上部電極5の中にエネルギーが閉じ込められた状態となる。

【0006】さらに、上部電極5のうちの入力側電極5aと出力側電極5bとが、ともに同電位となる対称モードの周波数と、互いに異なる電位となる非対称モードの周波数とを適切に設定することにより、入力側電極5aに印加された電気信号が、出力側電極5bに、低損失で伝わる。すなわち、フィルタの通過域を形成する。

【0007】このようなフィルタの特性は、圧電体膜4の厚さ $2h$ 、上部電極5の厚さ、下部電極3の厚さ、誘電体膜2の厚さ $g$ 、上部電極5の形状、及び入力側電極5aと出力側電極5bとの間隔によって決まる。

【0008】文献1には、圧電体膜4の厚さ $2h$ と誘電体膜2の厚さ $g$ とから定まる誘電体膜4の規格化厚さ $(g/h)$ が1.54及び2.4のときの例が示されている。また、文献1では、弾性波の温度特性と損失に注目して設計されたことが示されている。なお、文献1では、2次モードの弾性波を使用していることが示されている。上部電極5の表面と、誘電体膜2の下面との間が、弾性波の2分の1波長である場合が基本モード(1次モード)であり、 $N$ を整数として、 $N$ 次モードは、基本モードの $N$ 倍の波長の場合である。

【0009】図36は、例えば、特開平6-350154号公報(以下、文献3と記す)に示された従来のこの

種の薄膜圧電素子を示す図である。図36は断面図である。基本的な構造は、図35に示したものと同じであるが、圧電体膜7がチタン酸ジルコン酸鉛(PZT)からなり、下部電極3がチタン(Ti)膜8と白金(Pt)膜9とからなり、上部電極5がチタン膜10と金(Au)膜11とからなっている。

【0010】文献3には、圧電体膜7の厚さ $2h$ と下部電極3の厚さ $d$ とから定まる下部電極3の規格化厚さ $(d/h)$ が1.0のときの例が示されている。また、文献3では、チタン酸鉛( $PbTiO_3$ )とジルコン酸鉛( $PbZrO_3$ )の組成比によって、良好な圧電特性を実現できることが示されている。

【0011】チタン酸ジルコン酸鉛からなる圧電体膜7は、主振動として、厚み縦振動を励振する。このとき、表面に平行に伝搬する弾性波は、図37のような分散特性を示す。図37の横軸は表面に平行に伝搬する弾性波の波数 $k$ に圧電体膜7の厚さ $2h$ を乗じた圧電体膜7の規格化厚さ、すなわち規格化圧電体厚 $(2kh)$ であり、縦軸は周波数である。

【0012】図中、12は厚み縦振動の1次モード(TE1)の特性を示し、13は厚みすべり振動の2次モード(TS2)の特性を示し、14は厚みすべり振動の3次モード(TS3)の特性を示し、15は厚み縦振動の2次モード(TE2)の特性を示す。規格化圧電体厚が実数である領域は弾性波が伝搬モードとなる領域であり、虚数である領域は遮断モードとなる領域である。また、規格化圧電体厚が0である縦軸との交点での周波数は遮断周波数 $f_0$ である。

【0013】図37から明らかなように、厚み縦振動の1次モード(TE1)は、縦軸の近傍において、規格化圧電体厚が大きくなるにしたがって周波数が低くなる特性を示す。このことは、チタン酸ジルコン酸鉛以外に、チタン酸鉛( $PbTiO_3$ )やチタン酸リチウム( $LiTaO_3$ )やポアソン比が3分の1以下の材料からなる厚み縦振動を主振動とする圧電体膜でも同様である。

【0014】図37中の厚み縦振動の1次モード(TE1)のような特性を示すと、上部電極5がある領域の遮断周波数 $f_{a0}$ よりも高い周波数が遮断モードとなり、上部電極5がない領域の遮断周波数 $f_{f0}$ よりも低い周波数が伝搬モードとなる。このため、良好なエネルギー閉じ込めが実現できず、損失が増大したり、上部電極5周囲の影響を受けて、フィルタの特性のばらつきが大きくなる。

【0015】これを避ける方法として、従来は、例えば、特公昭58-58828号公報(以下、文献4と記す)に示されるような方法を用いていた。すなわち、チタン酸ジルコン酸鉛に、添加物を加え、添加物を加えたチタン酸ジルコン酸鉛のポアソン比を3分の1以上になるようにして、図37中の厚み縦振動の1次モード(TE1)のような特性ではなく、縦軸近傍において規格化

圧電体厚が大きくなるにしたがって周波数が高くなる特性を示すようにし、酸化亜鉛からなる圧電体膜4を用いた場合と同様のエネルギー閉じ込めが実現できるようにしている。なお、ポアソン比が3分の1をこえる場合には、厚み縦振動の1次モード(TE1)の遮断周波数は、厚みすべり振動の2次モード(TS2)の遮断周波数よりも高くなる。

【0016】

【発明が解決しようとする課題】従来のこの種の薄膜圧電素子では、エネルギー閉じ込めを実現できるのは、厚みすべり振動を主振動とする酸化亜鉛のような材料からなる圧電体膜に限られていた。このため、フィルタに要求される様々な特性に柔軟に対応することが難しいという問題点があった。

【0017】一方、厚み縦振動を主振動とするチタン酸ジルコン酸鉛のような材料からなる圧電体膜では、そのままでは、エネルギー閉じ込めを実現するのが困難であり、添加物を加えてポアソン比を3分の1以上にすることにより、エネルギー閉じ込めを実現していた。しかし、文献4に示される方法は、圧電セラミックスを焼結して作成する方法で初めて実現可能であり、圧電薄膜に適用した場合、圧電薄膜の膜質を良好に維持するのが困難であり、薄膜圧電素子の特性が劣化するという問題点があった。

【0018】この発明は上記のような問題点を解決するためになされたもので、厚み縦振動を主振動とする圧電体膜を用いたエネルギー閉じ込め可能な、従来より良好な特性の薄膜圧電素子を得ることを目的とする。

【0019】

【課題を解決するための手段】この発明に係る薄膜圧電素子は、基板と、基板上に形成された窒化シリコン(SiN)膜と窒化シリコン膜の上側に形成された酸化シリコン(SiO<sub>2</sub>)膜とからなる誘電体膜と、誘電体膜上に形成された下部電極と、下部電極上に形成された圧電体膜と、圧電体膜上に形成された上部電極とを備え、上部電極が存在する部位を含む領域に対向する基板の部位の厚さ方向を、基板の底面から窒化シリコン膜との境界面まで除去することによりバイアホールが形成されているものである。

【0020】この発明に係る薄膜圧電素子は、酸化シリコン膜が、窒化シリコン膜上及び上部電極上に分けて形成されているものである。

【0021】この発明に係る薄膜圧電素子は、圧電体膜が、厚み縦振動を主振動し、酸化シリコン膜の厚さが、窒化シリコン膜の厚さが振動特性に影響しないように窒化シリコン膜の厚さよりも大きく、かつ、圧電体膜の厚さの1.5倍以上であるものである。

【0022】この発明に係る薄膜圧電素子は、誘電体膜と、密度10000(kg/m<sup>3</sup>)以上の導体からなる下部電極と、厚み縦振動を主振動とする圧電体膜と、密

度10000(kg/m<sup>3</sup>)以上の導体からなる上部電極とを備え、圧電体膜の厚さを2hとし、誘電体膜の厚さをgとし、上部電極の密度を $\rho_1 \times 1000$ (kg/m<sup>3</sup>)とし、上部電極の厚さをd1とし、下部電極の密度を $\rho_2 \times 1000$ (kg/m<sup>3</sup>)とし、下部電極の厚さをd2とし、等価密度Rを $R = (\rho_1 d_1 / h) + (\rho_2 d_2 / h)$ としたとき、圧電体膜の厚さと誘電体膜の厚さから定まる誘電体膜の規格化厚さ(g/h)が $\{0.15 \times R + 2.8\}$ 以上であるものである。

【0023】この発明に係る薄膜圧電素子は、誘電体膜と、密度10000(kg/m<sup>3</sup>)以上の導体からなる下部電極と、厚み縦振動を主振動とする圧電体膜と、密度10000(kg/m<sup>3</sup>)以下の導体からなる上部電極とを備え、圧電体膜の厚さを2hとし、誘電体膜の厚さをgとし、上部電極の密度を $\rho_1 \times 1000$ (kg/m<sup>3</sup>)とし、上部電極の厚さをd1とし、下部電極の密度を $\rho_2 \times 1000$ (kg/m<sup>3</sup>)とし、下部電極の厚さをd2とし、等価密度Rを $R = (\rho_1 d_1 / h) + (\rho_2 d_2 / h)$ としたとき、圧電体膜の厚さと誘電体膜の厚さから定まる誘電体膜の規格化厚さ(g/h)が $\{0.023 \times R + 3.5\}$ 以上であるものである。

【0024】この発明に係る薄膜圧電素子は、誘電体膜が、基板上に形成された窒化シリコン(SiN)膜を有し、上部電極が存在する部位を含む領域に対向する基板の部位の厚み方向を、基板の底面から窒化シリコン膜との境界面まで除去したバイアホールが形成されているものである。

【0025】この発明に係る薄膜圧電素子は、誘電体膜が、基板上及び上部電極上分けて形成されているものである。

【0026】この発明に係る薄膜圧電素子は、下部電極が、主に白金(Pt)からなるものである。

【0027】この発明に係る薄膜圧電素子は、下部電極が、主にイリジウム(Ir)からなるものである。

【0028】この発明に係る薄膜圧電素子は、圧電体膜が、チタン酸鉛(PbTiO<sub>3</sub>)を主成分とするものである。

【0029】この発明に係る薄膜圧電素子は、圧電体膜が、チタンジルコン酸鉛(PZT)を主成分とするものである。

【0030】この発明に係る薄膜圧電素子は、圧電体膜が、タンタル酸リチウム(LiTaO<sub>3</sub>)を主成分とするものである。

【0031】この発明に係る薄膜圧電素子は、圧電体膜が、ポアソン比が0.33より小さい材料を主成分とするものである。

【0032】

【発明の実施の形態】以下、この発明の実施の一形態について説明する。

実施の形態1. 図1及び図2は、この発明の実施の形態

1による薄膜圧電素子を示す図である。図1は上面図、図2は図1中のI-I線に沿った断面図である。図中、1はシリコン(Si)基板、21はシリコン基板1上に形成された誘電体膜であり、この実施の形態では、シリコン基板1上に形成された窒化シリコン(SiN)膜16とその上に形成された酸化シリコン(SiO<sub>2</sub>)膜2とからなる。3は誘電体膜21上に形成された下部電極であり、この実施の形態では、酸化シリコン膜2上に形成されたチタン(Ti)膜とその上に形成された白金(Pt)膜とからなる。17はチタン酸鉛(PbTiO<sub>3</sub>)からなる圧電体膜である。5は圧電体膜17上に形成された上部電極であり、この実施の形態では、下部電極3と同じ構成である。18はエブリッジであり、上部電極5とボンディングパッド19とを接続する。20は下部電極3と接続したボンディングパッドである。なお、図34及び図35と同様の構成については同一符号を付して示す。バイアホール6は上部電極5が存在する部位を含む領域に対向するシリコン基板1の部位の厚さ方向を、シリコン基板1の底面から窒化シリコン膜16の境界面まで除去することにより形成されている。

【0033】窒化シリコン膜16は、特に、バイアホール6を形成するためのエッチング液に対する耐性と、平坦な面を実現するための内部応力に対する特性が良好であり、バイアホール6に接する面を形成するのに特に適している。このため、窒化シリコン膜16を用いることにより、エッチング時の素子の破壊を防ぐことができると同時に、バイアホール6を形成した際に、内部応力による変形による素子の特性の劣化を防ぐことができる。

【0034】下部電極3のチタン膜は、その上に形成された白金膜と誘電体膜21との密着性を向上させるために挿入している。また、圧電体膜17は白金膜の結晶格子に沿って成長するため、下部電極3の白金膜の結晶性は、良好な圧電体膜17を得る上で極めて重要である。また、上部電極5の白金膜は、耐腐食性や電気抵抗に対して比較的優れた特性を有するために使用している。これらの目的により、上部電極5及び下部電極3に白金膜とチタン膜とを用いているため、相対的に、白金膜の厚さの方が、チタン膜の厚さよりも大きい。例えば、白金膜の厚さが0.1 $\mu$ mでチタン膜の厚さが0.03 $\mu$ mのような関係となる。

【0035】以下の説明では、圧電体膜17の厚さを2hとし、上部電極5の厚さをd1とし、下部電極3の厚さをd2とし、誘電体膜21の厚さをgとする。ただし、白金膜の厚さの方が、チタン膜の厚さよりも大きく、さらに、白金の密度は21370(kg/m<sup>3</sup>)であるのに対して、チタンの密度は4540(kg/m<sup>3</sup>)であり、質量負荷に対しても、白金膜の方が大きく影響するため、上部電極5の厚さd1及び下部電極3の厚さd2として、白金膜の厚さを代表値として用いる。一方、窒化シリコン膜16と酸化シリコン膜2の密度に

大きな差はないので、誘電体膜21の厚さgとして、窒化シリコン膜16の厚さと酸化シリコン膜2の厚さの和を用いる。

【0036】図3及び図4は、実施の形態1による薄膜圧電素子の特性を示す図である。ここでは、上部電極5及び下部電極3が白金からなり、圧電体膜17がチタン酸鉛からなり、誘電体膜21が酸化シリコンからなるとした場合の特性を示している。図3及び図4は、圧電体膜17の厚さ2hと上部電極5の厚さd1とから定まる上部電極5の規格化厚さ(d1/h)、及び圧電体膜17の厚さ2hと下部電極3の厚さd2とから定まる下部電極3の規格化厚さ(d2/h)が、ともに0.02の場合の計算結果である。図3及び図4の横軸は、圧電体膜17の厚さ2hと誘電体膜21の厚さgとから定まる誘電体膜21の規格化厚さ、すなわち規格化SiO<sub>2</sub>厚(g/h)である。図3の縦軸は、電極部の共振周波数Frを、両面が自由表面の場合の厚み共振の共振周波数f<sub>0</sub>で規格化した規格化共振周波数(Fr/f<sub>0</sub>)である。図4の縦軸は、共振周波数Frと反共振周波数Faとから、 $k^2 = (Fa^2 - Fr^2) / Fr^2$ によって求めた実効的な電気機械結合係数k<sup>2</sup>である。

【0037】なお、計算には、分布定数線路を用いた等価回路を使用している。この等価回路は、例えば、特開平9-130200号公報(以下、文献5と記す)中に示されている等価回路(文献5の図3)によるものと同一である。等価回路中の上部電極5、圧電体膜17、下部電極3、及び誘電体膜21に対応する各分布定数線路等の各回路要素に、弾性定数、誘電率、及び圧電定数等の材料定数や各膜の厚さを用いて、等価回路の電気端子から見込んだインピーダンスを、周波数を変えて計算し、インピーダンスが最も0に近くなる周波数を共振周波数Frとし、インピーダンスの逆数であるアドミタンスが最も0に近くなる周波数を反共振周波数Faとした。

【0038】図中、21、24は厚み縦振動の1次モード(TE1)の特性を示し、22、25は2次モード(TE2)、23、26は3次モード(TE3)の特性を示す。

【0039】図3から明らかなように、1次モード(TE1)の規格化共振周波数は、規格化SiO<sub>2</sub>厚が0のとき、0.9よりわずかに小さい値であり、規格化SiO<sub>2</sub>厚が大きくなるにしたがって共振周波数Frが小さくなる。2次モード(TE2)、3次モード(TE3)の共振周波数Frも同様に、規格化SiO<sub>2</sub>厚が大きくなるにしたがって小さくなる。一方、図4から明らかなように、1次モード(TE1)の電気機械結合係数k<sup>2</sup>は、規格化SiO<sub>2</sub>厚が0に近いときにほぼ最大になり、規格化SiO<sub>2</sub>厚が大きくなるにしたがって小さくなる。2次モード(TE2)の電気機械結合係数k<sup>2</sup>は、規格化SiO<sub>2</sub>厚が1.5付近で最大となり、3次

モード (TE3) の電気機械結合係数  $k^2$  は、規格化  $\text{SiO}_2$  厚が3付近で最大となる。

【0040】図5及び図6は、上部電極5の規格化厚さ ( $d_1/h$ ) 及び下部電極3の規格化厚さ ( $d_2/h$ ) が、ともに0.1の場合の図3および図4と同様の計算結果である。図5及び図6の場合、図3及び図4の場合と比べて、上部電極5及び下部電極3が相対的に厚いため、図3と図5とを比較すると、共振周波数  $F_r$  は、図5の場合の方が同じ規格化  $\text{SiO}_2$  厚に対して低くなり、図4と図6とを比較すると、図6の場合の方が2次モード (TE2)、3次モード (TE3) の電気機械結合係数  $k^2$  が最大となる規格化  $\text{SiO}_2$  厚が大きい。

【0041】図3から図6に示した計算結果から明らかのように、誘電体膜21の厚さ  $g$  は、単に共振周波数  $F_r$  に影響するのみではなく、薄膜圧電素子に大きな影響を与える電気機械結合係数  $k^2$  に大きく影響することがわかる。さらに、図37から明らかのように、厚み縦振動の1次モード (TE1) が、規格化圧電体厚が増加するのにしたがって周波数が低下する高域遮断型特性を示すような場合でも、厚み縦振動の2次モード (TE2) は低域遮断型特性を示す。このため、例えば、上部電極5及び下部電極3の規格化厚さがともに0.1、規格化  $\text{SiO}_2$  厚が4付近である場合、厚み縦振動の2次モード (TE2) の電気機械結合係数  $k^2$  が最も大きく、かつ、エネルギー閉じ込め可能な薄膜圧電素子を実現できる。また、2次モード (TE2) の電気機械結合係数  $k^2$  は、1次モード (TE1) の最大値よりも30%程度小さいが、それでも、約13%程度の値が期待でき、これは、酸化亜鉛からなる圧電体膜を用いた従来のこの種の薄膜圧電素子の場合より大きいため、より広帯域な特性や、より低損失な特性の薄膜圧電素子を実現できる。3次モード (TE3) 以上の場合でも同様であり、薄膜圧電素子として必要な周波数と電気機械結合係数  $k^2$  から、使用するモードの次数を決めればよい。

【0042】図7は、図4及び図6に示した計算結果から、電気機械結合係数  $k^2$  がある条件を満足するための上部電極5の規格化厚さと規格化  $\text{SiO}_2$  厚との関係を示したものである。図7の横軸は、上部電極5の規格化厚さ、すなわち規格化電極厚 ( $d_1/h$ ) であり、縦軸は規格化  $\text{SiO}_2$  厚 ( $g/h$ ) である。

【0043】図中、27は1次モード (TE1) と2次モード (TE2) の電気機械結合係数  $k^2$  が等しくなる規格化  $\text{SiO}_2$  厚を示し、28は2次モード (TE2) の電気機械結合係数  $k^2$  が最大となる規格化  $\text{SiO}_2$  厚を示し、29は2次モード (TE2) と3次モード (TE3) の電気機械結合係数  $k^2$  が等しくなる規格化  $\text{SiO}_2$  厚を示し、30は3次モード (TE3) の電気機械結合係数  $k^2$  が最大となる規格化  $\text{SiO}_2$  厚を示す。

【0044】図7から明らかのように、規格化  $\text{SiO}_2$  厚を3以上、すなわち誘電体膜21の厚さ  $g$  を圧電体膜

17の厚さ  $2h$  の1.5倍以上にすると、2次モード (TE2) の電気機械結合係数  $k^2$  が最大となる規格化  $\text{SiO}_2$  厚を示した28以上にすることができる。このため、誘電体膜21の厚さ  $g$  を圧電体膜17の厚さ  $2h$  の1.5倍以上にすると、従来のこの種の薄膜圧電素子よりも実効的な電気機械結合係数  $k^2$  が大きく、より広帯域な特性や低損失な特性を有し、かつ、エネルギー閉じ込め可能な薄膜圧電素子を実現でき、本来、薄膜圧電素子の特性に無関係な圧電体端部の形状や圧電体端部とバイアホール端部との位置関係等による不要なスプリアスの発生を防ぎ、弾性波のエネルギーが上部電極の外側に伝搬して損失が大きくなることも防ぐことができる。

【0045】以上のように、この実施の形態1によれば、例えば、厚み縦振動の2次モード (TE2) の電気機械結合係数  $k^2$  が最も大きくなるように薄膜圧電素子を作成することによって、所望の良好な特性のエネルギー閉じ込め可能な薄膜圧電素子を実現できる効果が得られる。

【0046】実施の形態2。実施の形態2の薄膜圧電素子の基本的な構造は、図1及び図2に示したものと同一である。

【0047】図8から図11は、実施の形態2による薄膜圧電素子の特性を示す図である。ここでは、上部電極5及び下部電極3が白金からなり、圧電体膜17がチタン酸鉛からなり、誘電体膜21が酸化シリコンからなるとした場合の特性を示している。図8から図11の横軸は、規格化  $\text{SiO}_2$  厚 ( $g/h$ ) であり、縦軸は、遮断周波数  $f_c$  を両面が自由表面の場合の厚み共振の共振周波数  $f_0$  で規格化した規格化遮断周波数 ( $f_c/f_0$ ) である。遮断周波数  $f_c$  は、厚み共振する場合の共振周波数とはほぼ同じである。

【0048】図8は、上部電極5の規格化厚さ ( $d_1/h$ ) と下部電極3の規格化厚さ ( $d_2/h$ ) が、ともに0.1の場合の計算結果である。図9は、上部電極5の規格化厚さ ( $d_1/h$ ) と下部電極3の規格化厚さ ( $d_2/h$ ) が、ともに0.2の場合の計算結果である。図10は、上部電極5の規格化厚さ ( $d_1/h$ ) と下部電極3の規格化厚さ ( $d_2/h$ ) が、ともに0.3の場合の計算結果である。図11は、上部電極5の規格化厚さ ( $d_1/h$ ) と下部電極3の規格化厚さ ( $d_2/h$ ) が、ともに0.4の場合の計算結果である。

【0049】図中、31は厚みすべり振動の1次モード (TS1) の特性を示し、32は厚みすべり振動の2次モード (TS2) の特性を示し、33は厚みすべり振動の3次モード (TS3) の特性を示し、34は厚みすべり振動の4次モード (TS4) の特性を示し、35は厚み縦振動の1次モード (TE1) の特性を示し、36は厚み縦振動の2次モード (TE2) の特性を示す。

【0050】図8から図11に示した計算結果から明らかのように、規格化  $\text{SiO}_2$  厚が大きくなるにしたがって



て、各モードごとに、それぞれ、規格化遮断周波数は小さくなる。例えば、図8において、規格化 $\text{SiO}_2$ 厚が0.1の場合のTE1モードの規格化遮断周波数は0.719であるが、規格化 $\text{SiO}_2$ 厚が4.0の場合のTE1モードの規格化遮断周波数は0.348に低下する。

【0051】一方、異なるモード間での規格化遮断周波数の大小関係は、常に同じではなく、規格化 $\text{SiO}_2$ 厚によって、大小関係が変わる場合がある。特に、TE2モードとTS3モードとの大小関係は、薄膜圧電素子の特性に大きな影響を与えるので重要である。

【0052】図8では、規格化 $\text{SiO}_2$ 厚が約1.7以下の場合、TE2モードの規格化遮断周波数は、TS3モードの規格化遮断周波数よりも大きい。しかし、規格化 $\text{SiO}_2$ 厚が約1.7から約3.4の範囲では、TE2モードの規格化遮断周波数は、TS3モードの規格化遮断周波数よりも小さくなり、規格化 $\text{SiO}_2$ 厚が約3.4以上の場合、TE2モードの規格化遮断周波数は、TS3モードの規格化遮断周波数よりも大きくなる。

【0053】同様に、TE2モードの規格化遮断周波数が、TS3モードの規格化遮断周波数よりも小さくなる規格化 $\text{SiO}_2$ 厚の範囲は、図9では約1.9から約4.2、図10では約2.1から約4.8、図11では約2.2から約5.3である。

【0054】次に、上部電極5の規格化厚さ( $d_1/h$ )と下部電極3の規格化厚さ( $d_2/h$ )が異なる場合について、図8から図11と同じ計算を行った。図12は、上部電極5の規格化厚さ( $d_1/h$ )が0.1、下部電極3の規格化厚さ( $d_2/h$ )が0.33の場合の計算結果である。図13は、上部電極5の規格化厚さ( $d_1/h$ )が0.2、下部電極3の規格化厚さ( $d_2/h$ )が0.33の場合の計算結果である。図14は、上部電極5の規格化厚さ( $d_1/h$ )が0.3、下部電極3の規格化厚さ( $d_2/h$ )が0.33の場合の計算結果である。

【0055】図12から図14についても、TE2モードの規格化遮断周波数が、TS3モードの規格化遮断周波数よりも小さくなる規格化 $\text{SiO}_2$ 厚の範囲を求めると、図12では約1.8から約4.2、図13では約2.0から約4.5、図14では約2.1から約4.9である。

【0056】図15は実施の形態2による薄膜圧電素子の分散特性を示す図である。ここでは、上部電極5及び下部電極3が白金からなり、圧電体膜17がチタン酸鉛からなり、誘電体膜21が酸化シリコンからなるとした場合の分散特性を示している。図15の横軸は、規格化圧電体厚( $2kh$ )であり、縦軸は、規格化周波数( $f/f_0$ )である。 $f_0$ は、図8から図14の場合と同じである。規格化圧電体厚が0である縦軸との交点での各

モードの規格化周波数が、規格化遮断周波数( $f_c/f_0$ )である。

【0057】図15は、上部電極5の規格化厚さ( $d_1/h$ )が0.2、下部電極3の規格化厚さ( $d_2/h$ )が0.33であり、規格化 $\text{SiO}_2$ 厚( $g/h$ )が4.0の場合の計算結果であり、図13におけるTE2モードの規格化遮断周波数が、TS3モードの規格化遮断周波数よりも小さい領域での計算結果である。

【0058】図中、37はTS1モードの分散特性を示し、38はTS2モードの分散特性を示し、39はTS3モードの分散特性を示し、40はTS4モードの分散特性を示し、41はTE1モードの分散特性を示し、42はTE2モードの分散特性を示す。

【0059】図15から明らかなように、TE1モード及びTE2モードは、縦軸の近傍において、規格化圧電体厚が大きくなるにしたがって規格化周波数が低下する高域遮断形の分散特性を示す。これは、遮断周波数よりも高い周波数域が弾性波が伝搬できない遮断モードとなることを意味している。このような分散特性を示す場合、上部電極5の中に、弾性波のエネルギーを閉じ込めるエネルギー閉じ込めが良好に行われなため、薄膜圧電素子の特性が劣化する。従って、規格化 $\text{SiO}_2$ 厚( $g/h$ )が4.0の場合、厚み縦振動の1次モード(TE1)及び厚み縦振動の2次モード(TE2)のどちらのモードを使用しても良好な薄膜圧電素子が得られない。

【0060】図16は規格化 $\text{SiO}_2$ 厚( $g/h$ )が6.0の場合の図15と同様の計算結果であり、図13におけるTE2モードの規格化遮断周波数が、TS3モードの規格化遮断周波数よりも大きい領域での計算結果である。

【0061】図16から明らかなように、TE1モードは図15と同様に高域遮断形の分散特性を示すが、TE2モードは高域通過形の分散特性を示す。従って、規格化 $\text{SiO}_2$ 厚( $g/h$ )が4.0の場合、厚み縦振動の2次モード(TE2)を使用することにより、上部電極5に弾性波のエネルギーを閉じ込めることができ、良好な薄膜圧電素子が得ることができる。

【0062】図17は実施の形態2による薄膜圧電素子の特性を示す図である。ここでは、上部電極5及び下部電極3が白金からなり、圧電体膜17がチタン酸鉛からなり、誘電体膜21が酸化シリコンからなるとした場合の特性を示している。図17は、上部電極5の規格化厚さ( $d_1/h$ )が0.2であり、下部電極3の規格化厚さ( $d_2/h$ )が0.33である場合の計算結果である。この条件は、図13の場合と同じである。図17の横軸は、規格化 $\text{SiO}_2$ 厚( $g/h$ )であり、縦軸は、実効的な電気機械結合係数 $k^2$ である。

【0063】図17から明らかなように、規格化 $\text{SiO}_2$ 厚が約3以上約7以下の範囲では、TE2モードの実

効的な電気機械結合係数 $k^2$ が他のモードの場合より大きく、規格化 $\text{SiO}_2$ 厚が4.5付近でTE2モードの実効的な電気機械結合係数 $k^2$ は最大となる。従来、TE2モードを利用する薄膜圧電素子では、実効的な電気機械結合係数 $k^2$ が大きな値を有する範囲を使用していた。しかし、一方で、図13にて示したように、規格化 $\text{SiO}_2$ 厚が4.5以上でないと、TE2モードを用いてエネルギー閉じ込め可能な、良好な薄膜圧電素子を実現できない。

【0064】図18は実施の形態2による薄膜圧電素子の入力インピーダンス( $S_{11}$ )測定結果および出力インピーダンス( $S_{22}$ )測定結果を示す図である。図19は実施の形態2による薄膜圧電素子の通過特性の測定結果を示す図である。ここでは、上部電極5及び下部電極3がチタン膜を密着膜とした白金膜からなり、圧電体膜17がチタン酸鉛からなり、誘電体膜21が窒化シリコン膜を下地にした酸化シリコン膜からなる場合の測定結果を示している。

【0065】上部電極5を構成するチタン膜の厚さは $0.05\mu\text{m}$ 、白金膜の厚さは $0.15\mu\text{m}$ である。下部電極3を構成するチタン膜の厚さは $0.05\mu\text{m}$ 、白金膜の厚さは $0.15\mu\text{m}$ である。圧電体膜17の厚さ $2h$ は $0.9\mu\text{m}$ である。誘電体膜21を構成する窒化シリコン膜の厚さは $0.1\mu\text{m}$ 、酸化シリコン膜の厚さは $1.8\mu\text{m}$ である。従って、上部電極5の規格化厚さ( $d_1/h$ )及び下部電極3の規格化厚さ( $d_2/h$ )は約0.33、誘電体膜21の規格化厚さ( $g/h$ )は4.2である。また、上部電極5の入力側電極5a及び出力側電極5bの寸法は、 $14\times 80(\mu\text{m})$ の矩形であり、入力側電極5aと出力側電極5bとは $0.7\mu\text{m}$ 離れて配置している。

【0066】図18中、実線で示す43は入力インピーダンス( $S_{11}$ )の測定結果を示し、破線で示す44は出力インピーダンス( $S_{22}$ )の測定結果を示す。かなり大きな共振円が $800\text{MHz}$ 付近と $1.4\text{GHz}$ 付近にある。

【0067】図19中、実線で示す45は損失の測定結果を示し、破線で示す46は位相の測定結果を示す。図19から明らかなように、周波数 $800\text{MHz}$ 付近に通過域があり、また、周波数 $1.4\text{GHz}$ 付近に小さな通過域があり、そのすぐ高周波数側に損失が急峻に大きくなるゼロ点がある。

【0068】図18及び図19において、 $800\text{MHz}$ 付近の特性は、厚み縦振動の1次モード(TE1)による。また、 $1.4\text{GHz}$ 付近の特性は、厚み縦振動の2次モード(TE2)による。厚みすべり振動は、チタン酸鉛からなる圧電体膜17の場合、ほとんど発生しないため、測定結果には見られない。厚み縦振動の1次モード(TE1)は、図18に見られるように、大きな共振円がインピーダンス特性に見られ、また、図19に見ら

れるように、通過域もある。これに対して、厚み縦振動の2次モード(TE2)は、図18に見られるように、大きな共振円がインピーダンス特性に見られるが、図19に見られるように、通過域は極めて小さい。

【0069】図20及び図21は、酸化シリコン膜の厚さが $2.0\mu\text{m}$ の場合の図18及び図19と同様の測定結果である。従って、上部電極5の規格化厚さ( $d_1/h$ )及び下部電極3の規格化厚さ( $d_2/h$ )は約0.33、誘電体膜21の規格化厚さ( $g/h$ )は4.7である。また、上部電極5の入力側電極5a及び出力側電極5bの寸法は、 $14\times 80(\mu\text{m})$ の矩形であり、入力側電極5a及び出力側電極5bは $0.5\mu\text{m}$ 離れて配置している。

【0070】 $600\text{MHz}$ 付近と $1.3\text{GHz}$ 付近に共振円があるが、 $600\text{MHz}$ 付近の共振円は $1.3\text{GHz}$ 付近の共振円に比べて小さい。

【0071】図21から明らかなように、周波数 $600\text{MHz}$ 付近に通過域があり、また、周波数 $1.3\text{GHz}$ 付近にも通過域がある。

【0072】図18及び図19に示した測定結果と、図20及び図21に示した測定結果の違いは、誘電体膜21の厚さの違いによる。図18及び図19の場合の方が、図20及び図21の場合より誘電体膜21の厚さが小さいので、図20及び図21の場合よりも共振周波数が全体的に高い。また、図17からわかるように、厚み縦振動の1次モード(TE1)の実効的な電気機械結合係数 $k^2$ は、図18及び図19の場合の方が大きい。低周波数側の共振円が、図18の場合の方が図20の場合よりも大きいのはこのためと思われる。

【0073】一方、高周波数側の共振円については、図18と図20はほとんど同じであるが、通過特性は、図19と図21とで異なっている。図18から図21の測定に用いた規格化電極厚は、図9の場合に近い。図9から明らかなように、規格化 $\text{SiO}_2$ 厚は、図18及び図19の場合が4.2、図20及び図21の場合が4.7であり、どちらもエネルギー閉じ込めには不十分である。しかし、図20及び図21の場合の方がTE2モードとTS3モードとの交差点に近く、図18及び図19の場合の方が図20及び図21の場合よりエネルギー閉じ込めが不十分であり、その差が通過特性の差となったと思われる。

【0074】図22は、図8から図14に示した計算結果から、TE2モードとTS3モードとが交差する規格化 $\text{SiO}_2$ 厚を示したものである。図22の横軸は、上部電極5の規格化厚さ、すなわち規格化電極厚( $d_1/h$ )であり、縦軸は規格化 $\text{SiO}_2$ 厚( $g/h$ )である。

【0075】図中、実線で示す47、48は上部電極5と下部電極3が同じ厚さである場合を示し、一点鎖線で示す49、50は下部電極3の規格化厚さ( $d_2/h$ )

が0.33であり、上部電極5の厚さ( $d_1/h$ )が異なる場合を示す。また、図中、47, 79はTE2モードとTS3モードとが交差する規格化 $SiO_2$ 厚のうちの大きい方の値を示し、48, 50は、TE2モードとTS3モードとが交差する規格化 $SiO_2$ 厚のうちの小さい方の値を示す。

【0076】図22から明らかなように、上部電極5と下部電極3の厚さが異なる場合と、上部電極5と下部電極3の厚さが同じ場合とでは異なる軌跡を描くため、図22に示す方法では、上部電極5及び下部電極3の厚さと誘電体膜21の厚さとの関係を一般的に示すことができない。

【0077】厚み共振は、上部電極5と下部電極3の厚みによる弾性波の伝搬経路長の変化と、上部電極5と下部電極3の質量負荷によって変化するので、ここでは、上部電極5と下部電極3の質量負荷を表すために、等価密度 $R$ を、 $R = (\rho_1 d_1/h + \rho_2 d_2/h)$ と定義する。ここで、 $\rho_1$ は上部電極5の密度( $\times 1000 \text{ kg/m}^3$ )、 $\rho_2$ は下部電極3の密度( $\times 1000 \text{ kg/m}^3$ )であり、上部電極5や下部電極3が複数の種類の金属膜によって構成される場合は、金属膜毎に分けて等価密度を求めればよい。例えば、上部電極5と下部電極3が、それぞれ、白金膜とチタン膜とから構成され、上部電極5及び下部電極3を構成するチタン膜の厚さが $0.05 \mu\text{m}$ 、白金膜の厚さが $0.15 \mu\text{m}$ である場合、 $R = (4.58 \times 0.05/0.45 + 21.62 \times 0.15/0.45) \times 2 = 15$ となる。4.58はチタンの密度、21.62は白金の密度である。

【0078】図23は、図22に示したグラフを、横軸を等価密度 $R$ としてプロットしたものである。図23から明らかなように、上部電極5と下部電極3の厚さが異なる場合の軌跡と、上部電極5と下部電極3の厚さが同じ場合の軌跡がほぼ一致する。エネルギー閉じ込め可能な薄膜圧電素子を実現するためには、TE2モードとTS3モードとが交差する規格化 $SiO_2$ 厚のうちの大きい方の値を示す軌跡より、規格化 $SiO_2$ 厚が大きいことが必要である。図23中のTE2モードとTS3モードとが交差する規格化 $SiO_2$ 厚のうちの大きい方の値を示す軌跡から近似直線を求めると、( $g/h$ ) =  $(0.147 \times R + 2.85)$ となり、この直線より大きな規格化 $SiO_2$ 厚( $g/h$ )であることが、厚み縦振動の2次モード(TE2)を用いてエネルギー閉じ込め可能な、従来よりも良好な特性の薄膜圧電素子を実現するための条件となる。

【0079】以上のように、この実施の形態2によれば、規格化 $SiO_2$ 厚( $g/h$ )を $(0.147 \times R + 2.85)$ 以上とすることにより、厚み縦振動の2次モード(TE2)を用いてエネルギー閉じ込め可能であり、さらに従来のこの種の薄膜圧電素子よりも大きな電気機械結合係数を持ち、かつ主振動である厚み縦振動以

外の厚みすべり振動をほとんど生じないため、従来よりも低損失あるいは広帯域な特性を有する薄膜圧電素子を実現できる効果が得られる。

【0080】実施の形態3. 実施の形態3の薄膜圧電素子の基本的な構造は、図1及び図2に示したものと同一であるが、この実施の形態では、上部電極5がアルミニウム(A1)からなる。アルミニウムの密度は、 $2690 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ である。

【0081】図24から図26は、実施の形態3による薄膜圧電素子の特性を示す図である。ここでは、上部電極5がアルミニウムからなり、下部電極3が白金からなり、圧電体膜17がチタン酸鉛( $PbTiO_3$ )からなり、誘電体膜21が酸化シリコンからなるとした場合の特性を示している。図24から図26の横軸は、規格化 $SiO_2$ 厚( $g/h$ )であり、縦軸は、規格化遮断周波数( $f_c/f_0$ )である。

【0082】図24は、上部電極5の規格化厚さ( $d_1/h$ )が0.1、下部電極3の規格化厚さ( $d_2/h$ )が0.33の場合の計算結果である。図25は、上部電極5の規格化厚さ( $d_1/h$ )が0.2、下部電極3の規格化厚さ( $d_2/h$ )が0.33の場合の計算結果である。図26は、上部電極5の規格化厚さ( $d_1/h$ )が0.3、下部電極3の規格化厚さ( $d_2/h$ )が0.33の場合の計算結果である。

【0083】図中、51は厚みすべり振動の1次モード(TS1)の特性を示し、52は厚みすべり振動の2次モード(TS2)の特性を示し、53は厚みすべり振動の3次モード(TS3)の特性を示し、54は厚みすべり振動の4次モード(TS4)の特性を示し、55は厚み縦振動の1次モード(TE1)の特性を示し、56は厚み縦振動の2次モード(TE2)の特性を示す。

【0084】上部電極5がアルミニウムからなる場合でも、上部電極5が白金からなる図8から図14の場合と同様に、規格化 $SiO_2$ 厚によって、厚み縦振動の2次モード(TE2)と厚みすべり振動の3次モード(TS3)との大小関係が変わる。このため、図22の場合と同様に、図24から図26に示した計算結果から、TE2モードとTS3モードとが交差する規格化 $SiO_2$ 厚を図27に示した。

【0085】図中、破線で示す57, 58が上部電極5がアルミニウムからなる場合を示す。参考のため、図22に示した上部電極5が白金からなる場合の軌跡を、図27に示した。

【0086】図28は、図27に示したグラフを、横軸を等価密度 $R$ としてプロットしたものである。図28から明らかなように、上部電極5がアルミニウムからなる場合の軌跡が、上部電極5が白金からなる場合の軌跡と異なるのは、アルミニウムの密度が、白金の密度と大きく異なるため、質量負荷による寄与分と上部電極5の厚さによる寄与分との関係が、上部電極5がアルミニウム

からなる場合と白金からなる場合とで大きく異なることによる。図28中の上部電極5がアルミニウムからなる場合における、TE2モードとTS3モードとが交差する規格化 $\text{SiO}_2$ 厚のうちの大きい方の値を示す軌跡から近似直線を求めると、 $(g/h) = (0.023 \times R + 3.57)$ となる。上部電極5がアルミニウムからなる、エネルギー閉じ込め可能な薄膜圧電素子を実現するためには、規格化 $\text{SiO}_2$ 厚 $(g/h)$ を $(0.023 \times R + 3.57)$ 以上とすることが必要である。

【0087】以上のように、この実施の形態3によれば、規格化 $\text{SiO}_2$ 厚 $(g/h)$ を $(0.023 \times R + 3.57)$ 以上とすることにより、厚み縦振動の2次モード(TE2)を用いてエネルギー閉じ込め可能であり、さらに従来のこの種の薄膜圧電素子よりも大きな電気機械結合係数を持ち、かつ、主振動である厚み縦振動以外の厚みすべり振動をほとんど生じないため、従来よりも低損失あるいは広帯域な特性を有する薄膜圧電素子を実現できる効果が得られる。なお、上部電極5が圧電体膜17上に形成されたチタン膜とその上に形成されたアルミニウム膜とからなる場合も同様である。

【0088】なお、これまで示してきた厚み縦振動の2次モード(TE2)を用いてエネルギー閉じ込め可能な薄膜圧電素子を実現するための酸化シリコン膜の厚さは、実際の酸化シリコン膜中を伝搬する弾性波の速度によって変化する。媒質中を伝搬する弾性波の伝搬速度 $V$ は、その媒質の密度 $\rho$ と弾性定数 $c$ とから、 $V = (c/\rho)^{0.5}$ により求まる。

【0089】図29は、酸化シリコン膜の弾性定数 $c$ を0.9倍した場合の図25と同様の計算結果である。酸化シリコン膜の弾性定数 $c$ を0.9倍すると、伝搬速度 $V$ は約5%小さくなる。厚み縦振動の2次モード(TE2)と厚みすべり振動の3次モード(TS3)とが交差する規格化 $\text{SiO}_2$ 厚は1.60及び3.65であり、図25の場合よりも4%から5%小さくなる。

【0090】図30は、酸化シリコン膜の密度 $\rho$ を1.1倍した場合の図25と同様の計算結果である。酸化シリコン膜の密度 $\rho$ を1.1倍した場合も、伝搬速度 $V$ は約5%小さくなる。厚み縦振動の2次モード(TE2)と厚みすべり振動の3次モード(TS3)とが交差する規格化 $\text{SiO}_2$ 厚は1.63及び3.66であり、図25の場合よりも約4%小さくなる。

【0091】実施の形態4。実施の形態4の薄膜圧電素子の基本的な構造は、図1及び図2に示したものと同一であるが、この実施の形態では、下部電極3がイリジウム(Ir)からなる。イリジウムの密度は、 $22500 (\text{kg}/\text{m}^3)$ である。

【0092】下部電極3のイリジウム膜の結晶性は、白金膜の場合と同様に、圧電体膜17の結晶性に大きく影響し、良好な圧電体膜17を得る上で極めて重要である。圧電体膜17がチタン酸鉛からなる場合は、特に、

下部電極3にイリジウム膜を用いると、極めて良好な結晶性のチタン酸鉛膜を得ることができる。

【0093】イリジウムの密度は $22500 (\text{kg}/\text{m}^3)$ であり、白金の密度 $(21370 (\text{kg}/\text{m}^3))$ に極めて近い。このため、TE2モードとTS3モードとが交差する規格化 $\text{SiO}_2$ 厚の軌跡を求めると、図28中の実線で示す47、48の軌跡に近くなる。従って、下部電極3がイリジウムからなり、かつ上部電極5が白金からなる場合、規格化 $\text{SiO}_2$ 厚 $(g/h)$ を $(0.147 \times R + 2.85)$ 以上とすることにより、実施の形態2の場合と同様の効果が得られる。なお、下部電極3が誘電体膜21上に形成されたチタン膜とその上に形成されたイリジウム膜とからなる場合も同様である。

【0094】実施の形態5。実施の形態5の薄膜圧電素子の基本的な構造は、図1及び図2に示したものと同一であるが、この実施の形態では、上部電極5がアルミニウムとからなり、下部電極3がイリジウムとからなる。

【0095】イリジウムの密度は $22500 (\text{kg}/\text{m}^3)$ であり、白金の密度 $(21370 (\text{kg}/\text{m}^3))$ に極めて近い。このため、TE2モードとTS3モードとが交差する規格化 $\text{SiO}_2$ 厚の軌跡を求めると、図28中の破線で示す57、58の軌跡に近くなる。従って、下部電極3がイリジウムからなり、かつ上部電極5がアルミニウムからなる場合、規格化 $\text{SiO}_2$ 厚 $(g/h)$ を $(0.023 \times R + 3.57)$ 以上とすることにより、実施の形態3の場合と同様の効果が得られる。

【0096】実施の形態6。実施の形態6の薄膜圧電素子の基本的な構造は、図1及び図2に示したものと同一であるが、この実施の形態では、圧電体膜17がチタン酸ジルコン酸鉛(PZT)からなる。

【0097】PZTは、チタン酸鉛と特性が似ており、圧電体膜17がチタン酸ジルコン酸鉛からなる薄膜圧電素子は、図8から図14と同様の特性を示すので、TE2モードとTS3モードとが交差する規格化 $\text{SiO}_2$ 厚の軌跡を求めると、図23とはほぼ同じ結果が得られる。従って、圧電体膜17がチタン酸ジルコン酸鉛からなる場合、規格化 $\text{SiO}_2$ 厚 $(g/h)$ を $(0.147 \times R + 2.85)$ 以上とすることにより、実施の形態2の場合と同様の効果が得られる。

【0098】また、圧電体膜17がチタン酸ジルコン酸鉛からなる場合において、上部電極5がアルミニウムからなる場合は、規格化 $\text{SiO}_2$ 厚 $(g/h)$ を $(0.023 \times R + 3.57)$ 以上とすることにより、実施の形態3の場合と同様の効果が得られる。

【0099】実施の形態7。図31及び図32は、この発明の実施の形態7による薄膜圧電素子を示す図である。図31は上面図、図32は図31中のIII-III線に沿った断面図である。図中、17はチタン酸ジルコン酸鉛からなる圧電体膜、59は窒化シリコン膜16

上に形成された第1の酸化シリコン膜、60は上部電極5上に形成された第2のシリコン膜である。なお、図1及び図2と同様の構成については同一符号を付して示す。

【0100】この実施の形態では、窒化シリコン膜16上に形成された第1の酸化シリコン膜59と、上部電極5上に形成された第2のシリコン膜60とを備えている。このような構造の場合、厚み共振は、窒化シリコン16の下面と、第2のシリコン膜60の上面との間で生じる。この場合の共振周波数は、実質的に、第1の酸化シリコン膜59の厚さと第2の酸化シリコン膜60の厚さの和を $g$ とすることにより、上述した実施の形態の場合と同じ計算方法で求めることができる。すなわち、1層の酸化シリコン膜を2層に分けたと考えればよいので、チタン酸ジルコン酸鉛に添加物を加えるような操作をしなくても、エネルギー閉じ込め可能な薄膜圧電素子を実現できる。

【0101】また、このような構造の場合、最終的に、第2の酸化シリコン膜60の厚さを微調整することにより、製造時の厚さの誤差を調整することができると同時に、例えば、上部電極5をアルミニウムや銅(Cu)のような、金や白金より、耐蝕性の悪い材料で形成した場合の保護膜としても機能するので有効である。

【0102】上述した実施の形態では、圧電体膜17がチタン酸鉛やチタン酸ジルコン酸鉛からなる場合について示したが、タンタル酸リチウム( $\text{LiTaO}_3$ )からなる場合であっても同様の効果が得られる。さらに、ポアソン比が3分の1(0.33)以下の材料からなる主振動が厚み縦振動となる圧電体膜についても同様の効果が得られる。

【0103】また、上述した実施の形態では、上部電極5及び下部電極3が、白金、イリジウム、アルミニウム等の材料からなる場合について説明したが、密度が $10000(\text{kg}/\text{m}^3)$ 以上の導体からなる場合は、白金からなる場合の計算結果にはほぼ近いので、規格化 $\text{SiO}_2$ 厚( $g/h$ )を $(0.147 \times R + 2.85)$ 以上とすることにより、実施の形態2の場合と同様の効果を得ることができる。一方、密度が $10000(\text{kg}/\text{m}^3)$ 以下の導体からなる場合は、アルミニウムからなる場合の計算結果にはほぼ近いので、規格化 $\text{SiO}_2$ 厚( $g/h$ )を $(0.023 \times R + 3.57)$ 以上とすることにより、実施の形態3の場合と同様の効果が得られる。

【0104】また、上述した実施の形態では、基板としてシリコン(Si)基板を用いる場合に説明したが、ガリウム砒素( $\text{GaAs}$ )等の半導体基板、酸化マグネシウム( $\text{MgO}$ )等の誘電体基板を用いる場合でも、同様の効果が得られる。

【0105】また、上述した実施の形態では、上部電極5を入力側電極5aと出力側電極5bに分けて形成する場合について説明したが、図33に示すように、1つの

場合もある。

【0106】なお、以上、示した分散特性の計算方法は、例えば、文献：「固体振動論の基礎」、尾上守夫監修、オーム社、1982年、pp. 189-232にて詳しく述べられている。

【0107】また、計算に用いた材料定数は、チタン酸鉛については、文献：Neue Serie, ed.: Landolt-bornstein, pp. 80, Springer-Verlag, Berlin, 1981を用い、その他については、文献：B.A.Auld, "Acoustic Fields and Waves in Solids", vol. I, pp. 357-382, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons、及び国立天文台編、1997年理科年表、pp. 物19(438), pp. 物26(446)-27(447)を用いた。実際に使用する材料の定数と、これらの文献に示された材料定数とは同じとは限らないが、文献値と実際の材料の定数の比から換算して、適切な $\text{SiO}_2$ 厚を決定すればよい。

【0108】なお、これまで、規格化 $\text{SiO}_2$ 厚として表した量は、誘電体であれば酸化シリコンに限定する必要はなく、また、酸化シリコンは、実際には厳密な $\text{SiO}_2$ ではなく、 $\text{SiO}$ も含む。

【0109】

【発明の効果】以上のように、この発明によれば、基板と、基板上に形成された窒化シリコン( $\text{SiN}$ )膜と窒化シリコン膜の上側に形成された酸化シリコン( $\text{SiO}_2$ )膜とからなる誘電体膜と、誘電体膜上に形成された下部電極と、下部電極上に形成された圧電体膜と、圧電体膜上に形成された上部電極とを備え、上部電極が存在する部位を含む領域に対向する基板の部位の厚さ方向を、基板の底面から窒化シリコン膜との境界面まで除去することによりバイアホールが形成されているので、窒化シリコン膜により、バイアホールを形成するためのエッチング時の素子の破壊を防ぐことができると同時に、バイアホールを形成した際に、内部応力による変形による素子の特性の劣化を防ぐことができる効果がある。

【0110】この発明によれば、酸化シリコン膜が、窒化シリコン膜上及び上部電極上に分けて形成されているので、上部電極上に形成する酸化シリコン膜により、製造時の厚さの誤差を調整することができると同時に、上部電極を保護することができる効果がある。

【0111】この発明によれば、圧電体膜が、厚み縦振動を主振動し、酸化シリコン膜の厚さが、窒化シリコン膜の厚さが振動特性に影響しないように窒化シリコン膜の厚さよりも大きく、かつ、圧電体膜の厚さの1.5倍以上であるように構成したので、従来のこの種の薄膜圧電素子よりも実効的な電気機械結合係数 $k^2$ が大きく、より広帯域な特性や低損失な特性を有し、かつ、エネルギー閉じ込め可能な薄膜圧電素子を実現でき、本来、薄膜圧電素子の特性に無関係な圧電体端部の形状や圧電体端部とバイアホール端部との位置関係等による不要なスプリアスの発生を防ぎ、弾性波のエネルギーが上部電極

の外側に伝搬して損失が大きくなることも防ぐことができる効果がある。

【0112】この発明によれば、誘電体膜と、密度 $10000\text{ (kg/m}^3\text{)}$ 以上の導体からなる下部電極と、厚み縦振動を主振動とする圧電体膜と、密度 $10000\text{ (kg/m}^3\text{)}$ 以上の導体からなる上部電極とを備え、圧電体膜の厚さを $2h$ とし、誘電体膜の厚さを $g$ とし、上部電極の密度を $\rho_1 \times 1000\text{ (kg/m}^3\text{)}$ とし、上部電極の厚さを $d_1$ とし、下部電極の密度を $\rho_2 \times 1000\text{ (kg/m}^3\text{)}$ とし、下部電極の厚さを $d_2$ とし、等価密度 $R$ を $R = (\rho_1 d_1 / h) + (\rho_2 d_2 / h)$ としたとき、圧電体膜の厚さと誘電体膜の厚さとから定まる誘電体膜の規格化厚さ $(g/h)$ が $\{0.15 \times R + 2.8\}$ 以上であるように構成したので、厚み縦振動の2次モード(TE2)を用いてエネルギー閉じ込め可能であり、さらに従来のこの種の薄膜圧電素子よりも大きな電気機械結合係数を持ち、かつ主振動である厚み縦振動以外の厚みすべり振動をほとんど生じないため、従来よりも低損失あるいは広帯域な特性を有する薄膜圧電素子を実現できる効果がある。

【0113】この発明によれば、誘電体膜と、密度 $10000\text{ (kg/m}^3\text{)}$ 以上の導体からなる下部電極と、厚み縦振動を主振動とする圧電体膜と、密度 $10000\text{ (kg/m}^3\text{)}$ 以下の導体からなる上部電極とを備え、圧電体膜の厚さを $2h$ とし、誘電体膜の厚さを $g$ とし、上部電極の密度を $\rho_1 \times 1000\text{ (kg/m}^3\text{)}$ とし、上部電極の厚さを $d_1$ とし、下部電極の密度を $\rho_2 \times 1000\text{ (kg/m}^3\text{)}$ とし、下部電極の厚さを $d_2$ とし、等価密度 $R$ を $R = (\rho_1 d_1 / h) + (\rho_2 d_2 / h)$ としたとき、圧電体膜の厚さと誘電体膜の厚さとから定まる誘電体膜の規格化厚さ $(g/h)$ が $\{0.023 \times R + 3.5\}$ 以上であるよう構成したので、厚み縦振動の2次モード(TE2)を用いてエネルギー閉じ込め可能であり、さらに従来のこの種の薄膜圧電素子よりも大きな電気機械結合係数を持ち、かつ主振動である厚み縦振動以外の厚みすべり振動をほとんど生じないため、従来よりも低損失あるいは広帯域な特性を有する薄膜圧電素子を実現できる効果がある。

【0114】この発明によれば、誘電体膜が、基板上に形成された窒化シリコン(SiN)膜を有し、上部電極が存在する部位を含む領域に対向する基板の部位の厚み方向を、基板の底面から窒化シリコン膜との境界面まで除去したバイアホールが形成されているので、窒化シリコン膜により、バイアホールを形成するためのエッチング時の素子の破壊を防ぐことができると同時に、バイアホールを形成した際に、内部応力による変形による素子の特性の劣化を防ぐことができる効果がある。

【0115】この発明によれば、誘電体膜が、基板上及び上部電極上分けて形成されているので、上部電極上に形成する誘電体膜により、製造時の厚さの誤差を調整す

ることができると同時に、上部電極を保護することができる効果がある。

【0116】この発明によれば、下部電極が、主に白金(Pt)やイリジウム(Ir)からなるので、良好な圧電体膜を得ることができる効果がある。

【0117】この発明によれば、圧電体膜が、チタン酸鉛( $\text{PbTiO}_3$ )やチタンジルコン酸鉛(PZT)やタンタル酸リチウム( $\text{LiTaO}_3$ )やポアソン比が0.33より小さい材料を主成分とするものであるので、薄膜圧電素子に要求される特性に柔軟に対応することができる効果がある。

【図面の簡単な説明】

【図1】 この発明の実施の形態1による薄膜圧電素子を示す上面図である。

【図2】 この発明の実施の形態1による薄膜圧電素子を示す断面図である。

【図3】 この発明の実施の形態1による薄膜圧電素子の規格化共振周波数特性( $d_1/h=0.02$ ,  $d_2/h=0.02$ )を示す図である。

【図4】 この発明の実施の形態1による薄膜圧電素子の電気機械結合係数特性( $d_1/h=0.02$ ,  $d_2/h=0.02$ )を示す図である。

【図5】 この発明の実施の形態1による薄膜圧電素子の規格化共振周波数特性( $d_1/h=0.1$ ,  $d_2/h=0.1$ )を示す図である。

【図6】 この発明の実施の形態1による薄膜圧電素子の電気機械結合係数特性( $d_1/h=0.1$ ,  $d_2/h=0.1$ )を示す図である。

【図7】 電気機械結合係数 $k^2$ がある条件を満足するための上部電極の規格化厚さと規格化 $\text{SiO}_2$ 厚との関係を示す図である。

【図8】 この発明の実施の形態2による薄膜圧電素子の規格化遮断周波数特性( $d_1/h=0.1$ ,  $d_2/h=0.1$ )を示す図である。

【図9】 この発明の実施の形態2による薄膜圧電素子の規格化遮断周波数特性( $d_1/h=0.2$ ,  $d_2/h=0.2$ )を示す図である。

【図10】 この発明の実施の形態2による薄膜圧電素子の規格化遮断周波数特性図( $d_1/h=0.3$ ,  $d_2/h=0.3$ )を示す図である。

【図11】 この発明の実施の形態2による薄膜圧電素子の規格化遮断周波数特性( $d_1/h=0.4$ ,  $d_2/h=0.4$ )を示す図である。

【図12】 この発明の実施の形態2による薄膜圧電素子の規格化遮断周波数特性( $d_1/h=0.1$ ,  $d_2/h=0.33$ )を示す図である。

【図13】 この発明の実施の形態2による薄膜圧電素子の規格化遮断周波数特性( $d_1/h=0.2$ ,  $d_2/h=0.33$ )を示す図である。

【図14】 この発明の実施の形態2による薄膜圧電素

子の規格化遮断周波数特性 ( $d1/h=0.3$ ,  $d2/h=0.33$ ) を示す図である。

【図15】 この発明の実施の形態2による薄膜圧電素子の分散特性 ( $g/h=4.0$ ) を示す図である。

【図16】 この発明の実施の形態2による薄膜圧電素子の分散特性 ( $g/h=6.0$ ) を示す図である。

【図17】 この発明の実施の形態2による薄膜圧電素子の電気機械結合係数特性を示す図である。

【図18】 この発明の実施の形態2による薄膜圧電素子のインピーダンス特性 ( $g/h=4.2$ ) を示す図である。

【図19】 この発明の実施の形態2による薄膜圧電素子の通過特性 ( $g/h=4.2$ ) を示す図である。

【図20】 この発明の実施の形態2による薄膜圧電素子のインピーダンス特性 ( $g/h=4.7$ ) を示す図である。

【図21】 この発明の実施の形態2による薄膜圧電素子の通過特性 ( $g/h=4.7$ ) を示す図である。

【図22】 横軸を規格化電極厚として示した、この発明の実施の形態2による薄膜圧電素子のTE2モードとTS3モードが交差する規格化 $SiO_2$ 厚を示す図である。

【図23】 横軸を等価密度として示した、この発明の実施の形態2による薄膜圧電素子のTE2モードとTS3モードが交差する規格化 $SiO_2$ 厚を示す図である。

【図24】 この発明の実施の形態3による薄膜圧電素子の規格化遮断周波数特性 ( $d1/h=0.1$ ,  $d2/h=0.33$ ) を示す図である。

【図25】 この発明の実施の形態3による薄膜圧電素子の規格化遮断周波数特性 ( $d1/h=0.2$ ,  $d2/h=0.33$ ) を示す図である。

【図26】 この発明の実施の形態3による薄膜圧電素子の規格化遮断周波数特性 ( $d1/h=0.3$ ,  $d2/h=0.33$ ) を示す図である。

【図27】 横軸を規格化電極厚として示した、この発明の実施の形態3による薄膜圧電素子のTE2モードとTS3モードが交差する規格化 $SiO_2$ 厚を示す図である。

【図28】 横軸を等価密度として示した、この発明の実施の形態3による薄膜圧電素子のTE2モードとTS3モードが交差する規格化 $SiO_2$ 厚を示す図である。

【図29】 弾性定数を変えた場合における、この発明の実施の形態3による薄膜圧電素子の規格化遮断周波数特性を示す図である。

【図30】 密度を変えた場合における、この発明の実施の形態3による薄膜圧電素子の規格化遮断周波数特性を示す図である。

【図31】 この発明の実施の形態7による薄膜圧電素子を示す上面図である。

【図32】 この発明の実施の形態7による薄膜圧電素子を示す断面図である。

【図33】 薄膜圧電素子の変形例を示す断面図である。

【図34】 圧電体膜が酸化亜鉛からなる従来の薄膜圧電素子を示す上面図である。

【図35】 圧電体膜が酸化亜鉛からなる従来の薄膜圧電素子を示す断面図である。

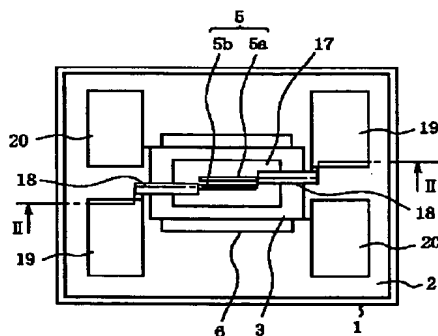
【図36】 圧電体膜がPZTからなる従来の薄膜圧電素子の断面図である。

【図37】 圧電体膜がPZTからなる従来の薄膜圧電素子の分散特性を示す図である。

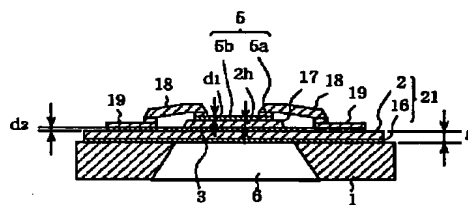
#### 【符号の説明】

1 シリコン(Si)基板、2 酸化シリコン( $SiO_2$ )膜、3 下部電極、5 上部電極、6 バイアホール、16 窒化シリコン( $SiN$ )膜、17 圧電体膜、21 誘電体膜、59 第1の酸化シリコン膜、60 第2のシリコン膜。

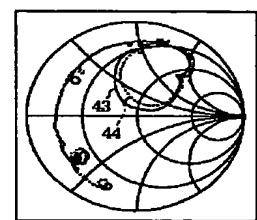
【図1】



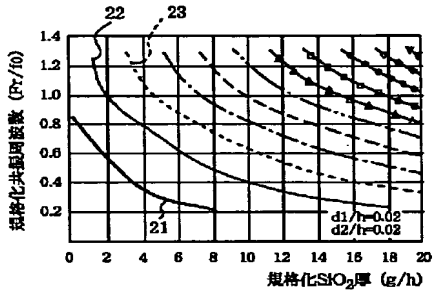
【図2】



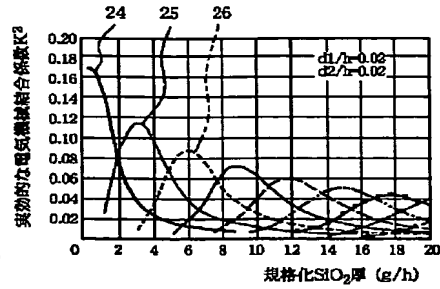
【図20】



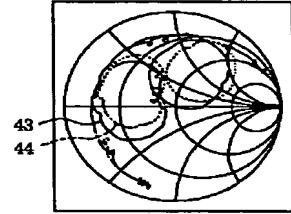
【図3】



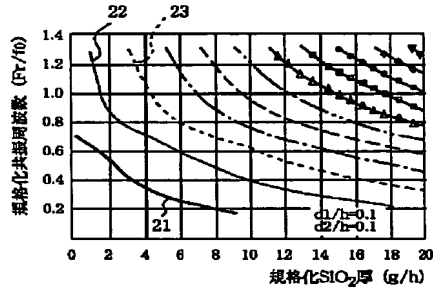
【図4】



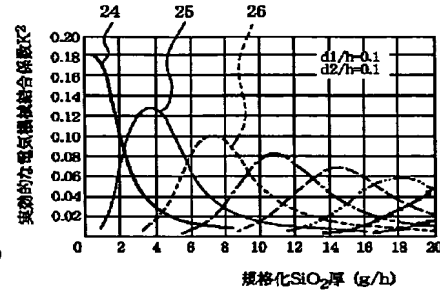
【図18】



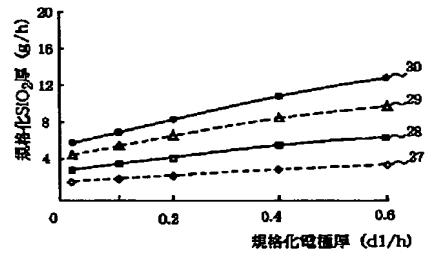
【図5】



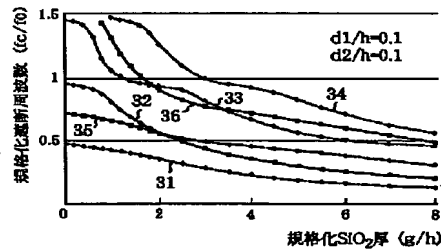
【図6】



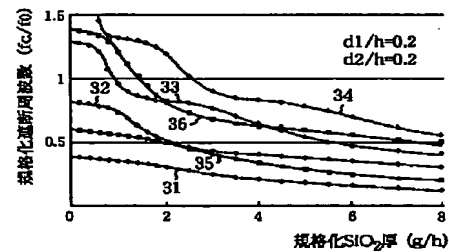
【図7】



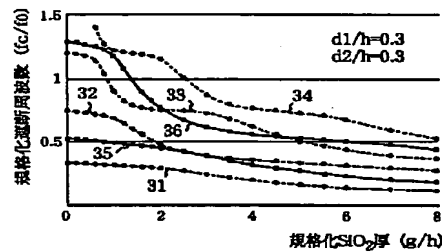
【図8】



【図9】

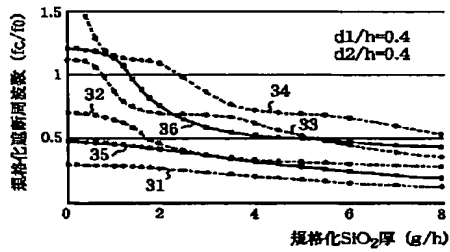


【図10】

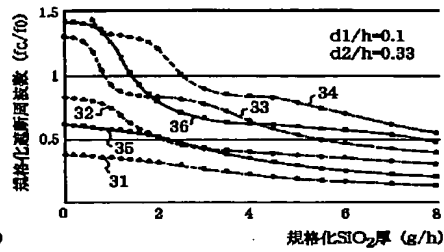




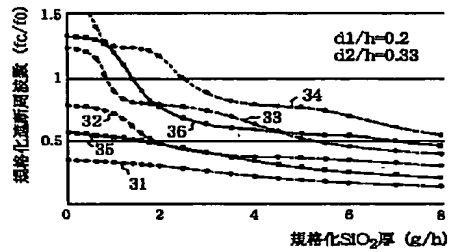
【図11】



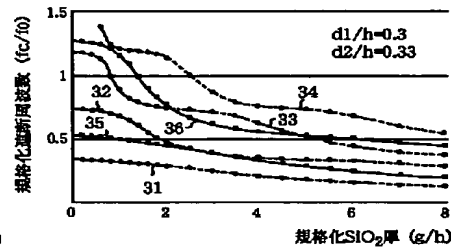
【図12】



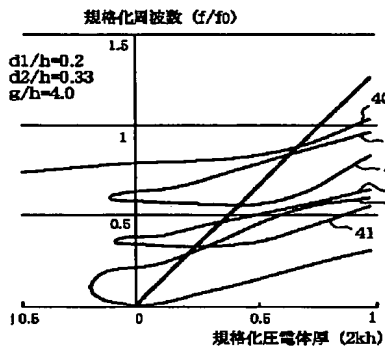
【図13】



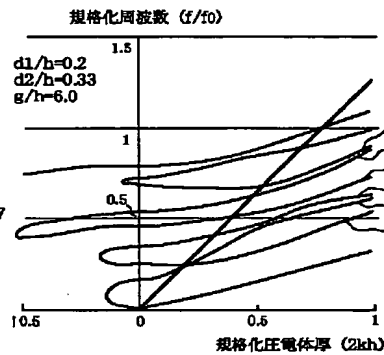
【図14】



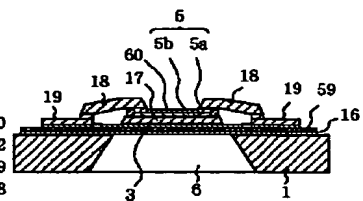
【図15】



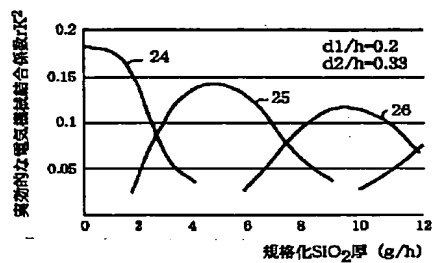
【図16】



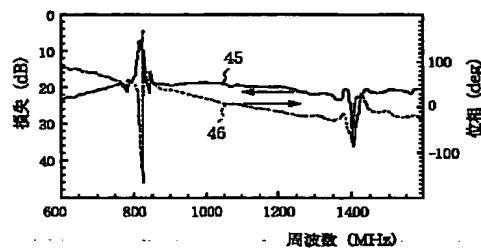
【図32】



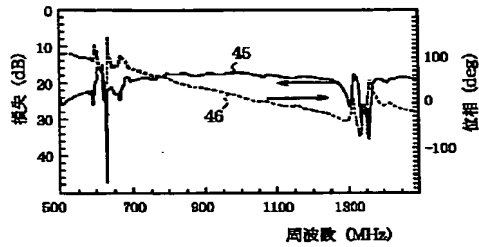
【図17】



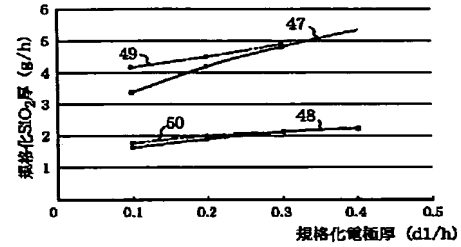
【図19】



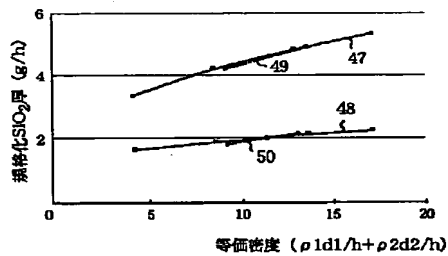
【図21】



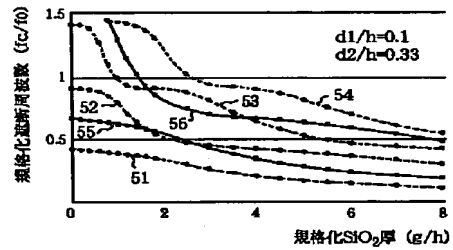
【図22】



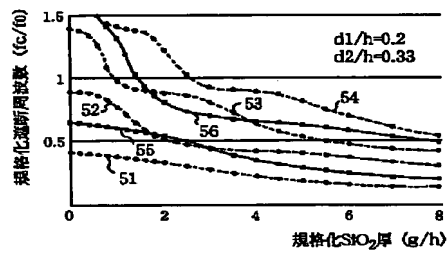
【図23】



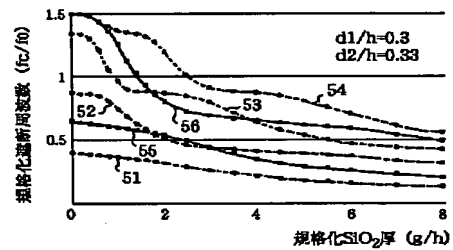
【図24】



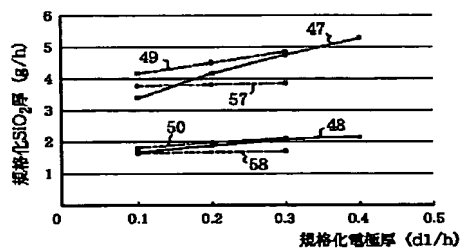
【図25】



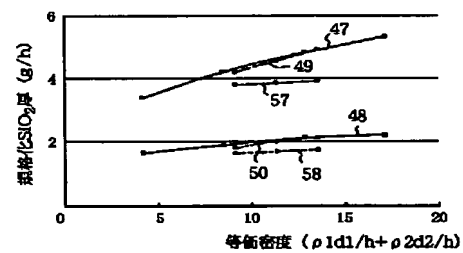
【図26】



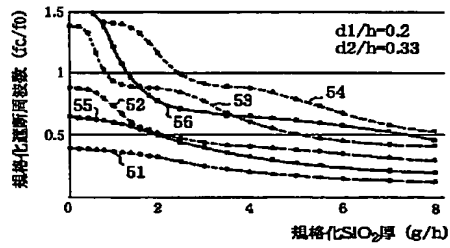
【図27】



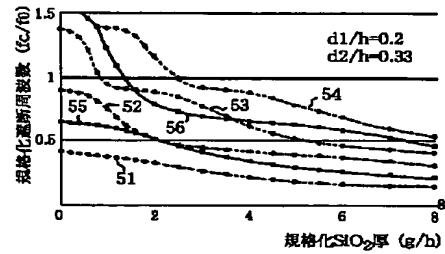
【図28】



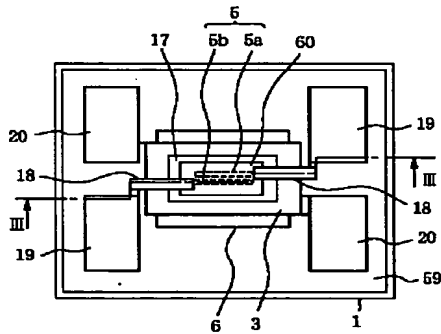
【圖 29】



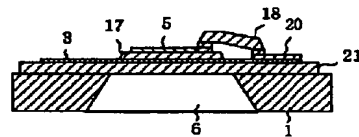
【圖 30】



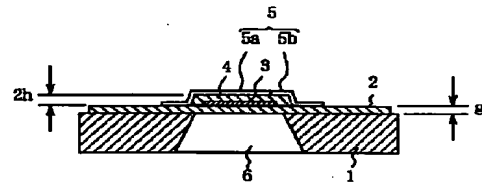
【圖 31】



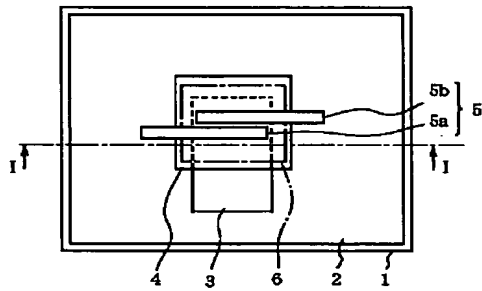
【圖 33】



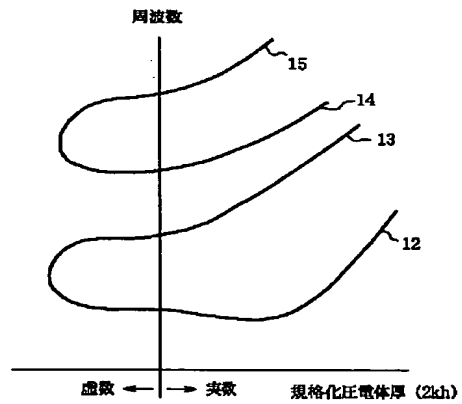
【圖 35】



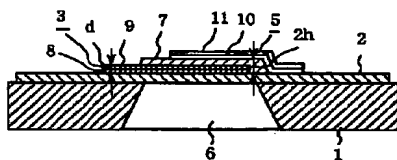
【圖 34】



【圖 37】



【圖 36】



フロントページの続き

(72)発明者 井幡 光詞  
東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三  
菱電機株式会社内  
(72)発明者 和高 修三  
東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三  
菱電機株式会社内  
(72)発明者 山田 朗  
東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三  
菱電機株式会社内

(72)発明者 内川 英興  
東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三  
菱電機株式会社内  
(72)発明者 前田 智佐子  
東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三  
菱電機株式会社内  
(72)発明者 永塚 勉  
東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三  
菱電機株式会社内